УДК 550.341.5

О ВОЗМОЖНОЙ СВЯЗИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С АНОМАЛЬНЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ ДАВЛЕНИЯ В ДВУХФАЗНОМ ГЕОТЕРМАЛЬНОМ РЕЗЕРВУАРЕ

А.В. Кирюхин[1], В.А. Корнеев[2], А.Ю. Поляков[1]

[1]Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Пийпа-9, г. Петропавловск-Камчатский 683006, Россия

[2]Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, MS90-1116, One Cyclotron Rd, Berkeley CA 94720, USA

Поступила в редакцию 22.12.2004 г.

В результате анализа 10-летних наблюдений за изменением давления в двухфазном геотермальном резервуаре Мутновского геотермального месторождения (Камчатка) выявлена повышенная вероятность понижения давления в резервуаре (на 1.0-1.5 бар и более) за несколько месяцев перед сильными землетрясениями (M≥5.8 в области, ограниченной 157-161 в.д., 50-54 с.ш. и глубиной до 40 км). Вероятность сильного землетрясения после наблюдаемой гидродинамической аномалии достигает 0.38 в первые 40 сут, и 0.88 в первые 8 месяцев, что превышает вероятность, соответствующую Пуассоновскому процессу ожидания соответствующего землетрясения. Кроме того, режим изменения давления в резервуаре характеризуется цикличностью с частотами 72-180 сут$^{-1}$ и амплитудой более 0.5 бар, что может объясняться как циклическими термогидродинамическими процессами в самой скважине, так и циклическими изменениями напряженного состояния резервуара. В статье приводится также информация по трем гидродинамическим аномалиям (период наблюдений 2001-2004 гг), предшествующих сейсмическим событиям (одна из аномалий аналогична изложенным в работах [4,7]).

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг давления в скв. 30 (52.551 с.ш., 158.234 в.д.) на Верхне-Мутновском участке (рис.1), вскрывающей двухфазный 250-270°C трещиноватый геотермальный резервуар осуществляется с 1995 г с использованием системы типа «капиллярная трубка» (Pruett Inc.), установленной на глубине 950 м. Благодаря двухфазным условиям и низкой проницаемости, скважина практически не реагирует на эксплуатацию месторождения (начавшуюся в 1999 г) и, поэтому все аномальные вариации давления в ней предполагаются вызванными естественной динамикой резервуара (раскрытие или закрытие трещин вследствие изменения напряженного состояния). Существование таких активных трещин, связанных магматической питающей системой действующего вулкана Мутновский обосновано в работах [3,7]. Выявленные ранее аномальные вариации давления (гидродинамические аномалии) в геотермальном резервуаре Мутновского геотермального месторождения синхронизированные с сейсмическими событиями описаны в работе [4,7]: это три значимые гидродинамические аномалии, характеризующиеся средним снижением давления на 0.10-0.15 бар за 2-4 часа до землетрясений, и постсейсмическими циклическими вариациями давления (с амплитудой 0.7-0.95 бар и частотой 14-17 сут$^{-1}$) в течение 1-1.5 сут. после землетрясений (с магнитудой 4.1-4.5 на расстоянии 82-112 км от точки наблюдений). Для исследования механизма циклических изменений давления использованы численные модели типа «трещина-скважина-трещина» базирующиеся на коде TOUGH2 [6], однако эти модели не дали удовлетворительного объяснения наблюдаемым циклам в рамках замкнутых термогидродинамических моделей без привлечения «включателя/выключателя» скважины при определенном значении паронасыщения. В дальнейшем, при анализе данных наблюдений 1995-2004 гг, выявлены аномальные снижения давления в скв.30 на Мутновском геотермальном месторождении (на 1.0-1.5 бар и более), предшествующие землетрясениям (M>5.8) (анализировались сейсмические события в области, ограниченной 157-161 в.д., 50-54 с.ш. и глубиной до 40 км). Кроме того, при переходе в 1998 г на более

высокую частоту записи наблюдений (2 мин$^{-1}$) обнаружены циклические изменения давления с частотами 72-180 сут$^{-1}$ и амплитудой более 0.5 бар [5,7]. Близкие частоты вариаций расхода (давления) характерны также для некоторых других пароводяных скважин Мутновского геотермального месторождения (36-300 сут$^{-1}$, скв. О15, Э-2, Э-4, А4 и др.), гейзеров на Паужетском геотермальном месторождении 85-720 сут$^{-1}$ [1] и в Долине Гейзеров 4-50 сут$^{-1}$ [2]. Более подробное изложение этой информации по данным наблюдений по скв. 30 Мутновского геотермального месторождения и их возможная интерпретация является предметом данной статьи. Кроме того, в статью добавлена информация по трем гидродинамическим аномалиям (период наблюдений 2001-2004 гг), предшествующим сейсмическим событиям (одна из них аналогична изложенным в работах [4,7]).

АНОМАЛЬНЫЕ ПОНИЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В СКВ. 30 (ВЕРХНЕ-МУТНОВСКИЙ ГЕОТЕРМАЛЬНЫЙ РЕЗЕРВУАР) И ИХ ВОЗМОЖНАЯ СВЯЗЬ С СИЛЬНЫМИ (M≥5.8) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ.

Методика регистрации давления в геотермальном резервуаре Мутновского геотермального месторождения изложена в работе [4]. На рис.2 изображен график изменения давления в скв.30, времена землетрясений (M≥5.8 в области, ограниченной 157-161 в.д., 50-54 с.ш. и глубиной до 40 км). На том же рисунке показаны моменты, интерпретируемые нами как аномальные понижения давления в геотермальном резервуаре (на 1.0-1.5 бар и более) предшествующие сильным землетрясениями (M≥5.8). В таблице 1 данные КОМСП ГС РАН по сильным землетрясениям. В ней приведено 21 землетрясение (M≥5.8), из числа которых выделяются наиболее сильные землетрясения в группах и одиночных, относительно которых диагностировались гидродинамические аномалии в скв. 30 (всего их выделяется за девять лет в рассматриваемой области - двенадцать за период с окт. 1995 по окт. 2004 г). В таблице 2 представлены времена, соответствующие аномальным понижениям давления в

геотермальном резервуаре (всего их зафиксировано 8) и соответствующим сильным землетрясениям.

По данным табл.2 возможна оценка фактического распределения вероятности времени ожидания сильного землетрясения после наблюдаемой гидродинамической аномалии (если в качестве вероятностного пространства используются восемь пар событий с вероятностью каждой реализации 0.125). На рис.3 изображен график, соответствующий распределению вероятности времени ожидания сильного землетрясения после наблюдаемой гидродинамической аномалии. Для сравнения, на том же рис.3 изображено показательное распределение соответствующее процессу Пуассона с интенсивностью потока событий 3.70 10^{-3} сут$^{-1}$ (что соответствует 9 месячному среднему значению интервала времени, в течение которого происходили рассматриваемые сильные землетрясения). Из рисунка видно, что вероятность сильного землетрясения после наблюдаемой гидродинамической аномалии достигает 0.38 в первые 40 сут, и 0.88 в первые 8 месяцев, что значительно превышает вероятность соответствующего Пуассоновского процесса.

Заметим также, что землетрясения, приведенные в табл. 2 характеризуются однотипным механизмом(табл. 3): это взбросы северо-восточного простирания с падением сместителя 21-32° СЗ или 58-70° ЮВ. В последнем случае геометрия подвижек совпадает с параметрами продуктивной трещины на Верхне-Мутновском участке [3,7]. Это может служить объяснением того, что некоторые сильные землетрясения (2, 3, 4, 6, 7, 9, 11 см. табл. 2) сопоставляются с гидродинамическими аномалиями (геометрия подвижек совпадает с параметрами продуктивной трещины на Верхне-Мутновском участке), а некоторые нет (5, 8, 10) (геометрия подвижек не совпадает с параметрами продуктивной трещины на Верхне-Мутновском участке).

ЦИКЛИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ВЕРХНЕ-МУТНОВСКОМ ГЕОТЕРМАЛЬНОМ РЕЗЕРВУАРЕ

Циклические изменения давления в скв.30 были обнаружены с первых часов наблюдений в сентябре 1995 г когда частота записи составляла 1 мин$^{-1}$, периодичность достаточно отчетливо проявлена и при опросе с частотой 2 мин$^{-1}$, которая осуществляется с июня 1998 г. Циклические изменения давления характеризуются частотами 72 - 180 сут$^{-1}$ и амплитудой более 0.5 бар. Рис.4 показывает спектрограмму за декабрь 2001 г, где хорошо видны частоты 90 и 160 сут$^{-1}$, а рис.5 показывает изменение давления за трехчасовой интервал времени 25 декабря 2001 г. Эти графики являются достаточно характерными для режима скважины за весь период наблюдений с 1995 по 2004 гг. Отмечено также, что при приоткрытии задвижки скважины частота изменений давления может несколько увеличиваться.

Возможными причинами циклических изменений давления могут быть следующие:

(1) «Гейзерный режим» в самой скважине по механизму тепловой трубки или по камерному механизму [2].

(2) Циклическое изменение раскрытия трещин резервуара, сообщающихся со скважиной. Можно показать, что при периодическом изоэнтропийном расширении/сжатии пароводяного флюида (с паронасыщением 0.90) с частотой 72 сут$^{-1}$ в трещине с раскрытием 1 см - амплитуда изменения давления 0.5 бар достигается изменением раскрытия трещины менее 2 % (что при раскрытии трещины 1 см составляет практически незаметную величину порядка 0.2 мм). Одним из возможных источников таких циклических вариаций напряженного состояния геотермального резервуара может являться система магматических каналов активной вулканической зоны Камчатки с вертикальной глубиной 130-190 км.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ В СКВ. 30 (ВЕРХНЕ-МУТНОВСКИЙ ГЕОТЕРМАЛЬНЫЙ РЕЗЕРВУАР) ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ СЕЙСМИЧЕСКИМ СОБЫТИЯМ (ПЕРИОД НАБЛЮДЕНИЙ 2001-2004 ГГ).

Приведем также информацию по трем гидродинамическим аномалиям, предшествующим сейсмическим событиям (период наблюдений 2001-2004 гг).

Первая из них зафиксирована за 17 часов до землетрясения (M=5.2, глубина 13 км, координаты 52.55 с.ш., 160.54 в.д.). Аномалия проявилась в изменениях давления с амплитудой до 6.5 бар с постепенным затуханием в течение 1.5 часов (рис.6).

Вторая гидродинамическая аномалия (рис. 7) синхронизирована с землетрясением (M=5.7, глубина 37 км, координаты 52.96 с.ш., 160.45 в.д.). Эта аномалия полностью аналогична изложенным в работах [4,7], однако проявлена более контрастно: перед землетрясением наблюдалось понижение давления в течение 1.5 часов на 4.5 бара, после землетрясения проявились циклические колебания с амплитудой 8.5 бар, которые постепенно затухали в течение 1 часа..

Отметим также третью гидродинамическую аномалию (рис. 8), зафиксированную за 24 часа до цунамигенного землетрясения (M=9.0), происшедшего 26 дек. 2004 г в у берегов о. Суматра (Индонезия). Аномалия проявилась в резком снижении давления на 2.5 бара, наблюдавшимся в течение 2 часов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа 10-летних наблюдений за изменением давления в двухфазном геотермальном резервуаре Мутновского геотермального месторождения (Камчатка) выявлена повышенная вероятность понижения давления в резервуаре (на 1.0-1.5 бар и более)

за несколько месяцев перед сильными землетрясениями (M≥5.8 в области, ограниченной 157-161 в.д., 50-54 с.ш. и глубиной до 40 км). Вероятность сильного землетрясения после наблюдаемой гидродинамической аномалии достигает 0.38 в первые 40 сут, и 0.88 в первые 8 месяцев, что значительно превышает вероятность соответствующего Пуассоновского процесса.

2. Режим изменения давления в двухфазном геотермальном резервуаре характеризуется цикличностью с частотами 72-180 сут$^{-1}$ и амплитудой более 0.5 бар, что может объясняться как циклическими термогидродинамическими процессами в самой скважине, так и циклическими изменениями напряженного состояния резервуара.

3. За период наблюдений 2001-2004 гг. выявлены также три гидродинамические аномалии, предшествующие сейсмическим событиям, одна из них аналогична изложенным в работах [4,7]), две других наблюдались в течение суток перед сильными землетрясениями.

Гидродинамические наблюдения на Мутновском геотермальном месторождении осуществлялись в течение девяти лет благодаря самоотверженной работе в экстремальных погодных условиях инженера М.Д. Лесных. Авторы выражают также признательность академику РАН С.А. Федотову за помощь в постановке задачи, членам Объединенного Совета ИВиС ДВО РАН и КОМСП ГС РАН по прогнозу землетрясений и извержений вулканов Н.И. Селиверстову, И.И. Степанову, Ю.М. Хаткевичу, Ю.Д. Матвиенко, В.К. Лемзикову, В.М. Ившину, В.А. Салтыкову, Л.Г. Осипенко – за регулярное обсуждение результатов, сотрудникам КОМСП ГС РАН В.И. Левиной и Е.И. Ивановой – за консультации, В.А. Дрознину, Г.М. Водинчару и П.П. Фирстову – за конструктивную критику работы. Авторы выражают также признательность Зам. генерального директора ОАО «ДВЭУК» по работе с ОАО «Геотерм» В.Е. Лузину и сотрудникам ОАО «Геотерм» И.И. Черневу, Л.К. Москалеву, Ц.С. Сангадиеву за помощь в проведении наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Аверьев В.В. Сугробов В.М. Естественные термопроявления на Паужетском месторождении // «Паужетские горячие воды на Камчатке», М: Наука, 1965. С. 31-43

2. Дрознин В.А. Создание центра коллективного пользования по изучению и мониторингу уникального природного объекта – Долины Гейзеров // Проект ФЦП «Интеграция» №Ч0103 от 01.11.02 // http:\www.ch0103.emsd.iks.ru

3. Кирюхин А.В., Такахаши М., Поляков А.Ю. и др. Исследование условий водного питания Мутновского геотермального месторождения с использованием данных по изотопии кислорода (O^{18}) и водорода (D) // Вулканология и сейсмология. 1998. №4-5. С.54-62.

4. Кирюхин А.В. Лесных М.Д. Поляков А.Ю. Естественный гидродинамический режим Мутновского геотермального резервуара и его связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. 2002. №1. С.51-60.

5. Кирюхин А.В. Леонов В.Л. Словцов И.Б. и др. // Моделирование эксплуатации участка Дачный Мутновского геотермального месторождения в связи с обеспечением теплоносителем Мутновской ГеоЭС 50 МВт // Вулканология и сейсмология. 2004.(в печати)

6. Г.Корн, Т. Корн Справочник по математике. М.: Наука, 1978. 831 с.

7. Kiryukhin A., Lesnykh M., Polyakov A., Kalacheva E.(1998) TOUGH Applications to Analysis of the Pressure Transient Data of the Verkhne-Mutnovsky Site, Mutnovsky Geothermal Field, Kamchatka // Proc. of the TOUGH Workshop’98, LBNL-41995, Berkeley, CA, p.65-70.

8. Kiryukhin A., Pruess K.(2000) Modeling Studies of Pressure Cycling Associated with Seismisity in Mutnovsky Geothermal Field, Kamchatka, Russia// WGC, Japan

9. A. Kiryukhin, M. Lesnykh, A. Polyakov Pressure Perturbations in Two Phase Geothermal Reservoir Associated with Seismisity // Stanford University Proc. 28 Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford, CA, USA 2003, 28, 6 p.

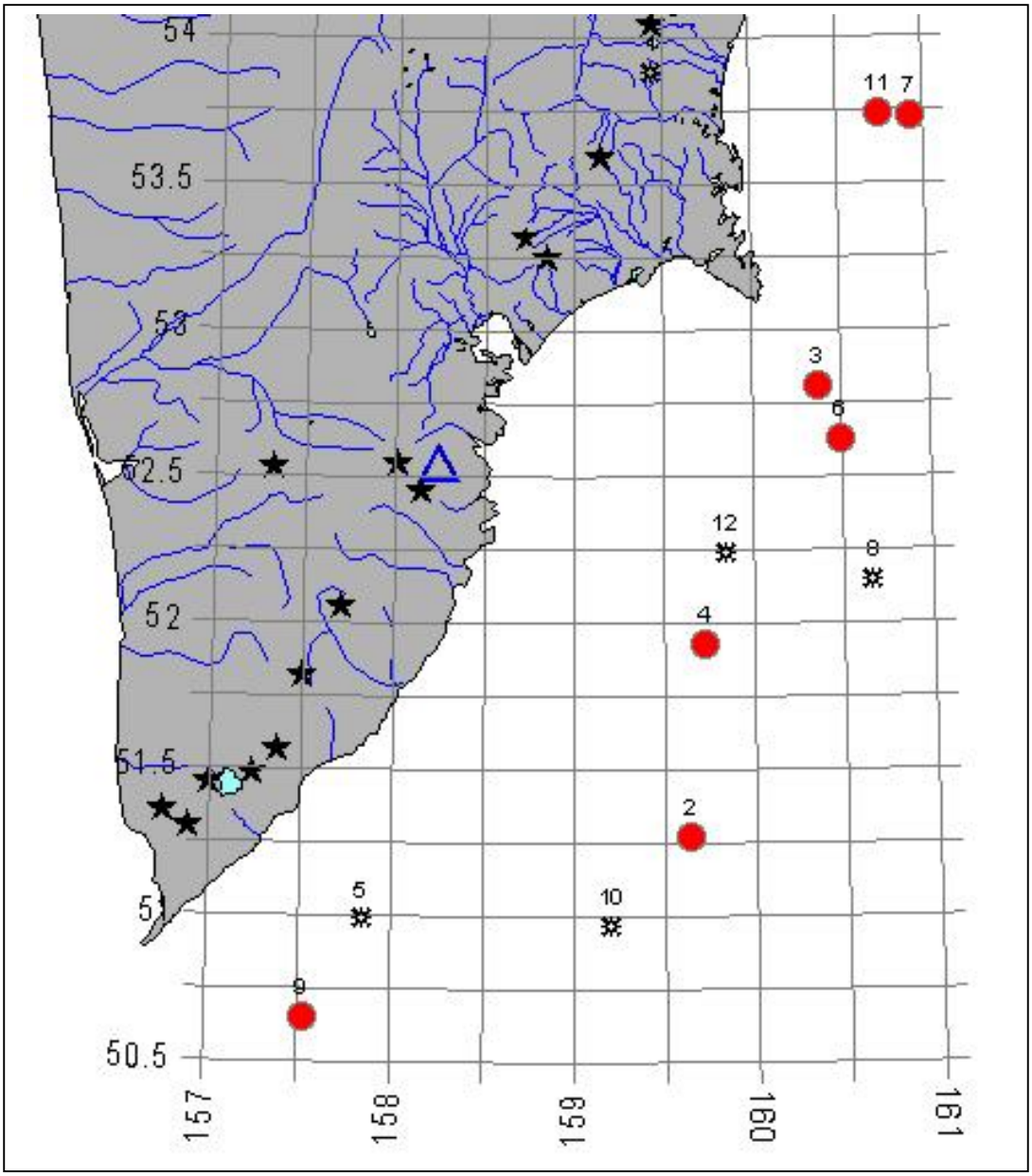

Рис.1 Горизонтальная проекция области (157-161 в.д.,50-54 с.ш.) по которой проводился анализ связи гидродинамических аномалий с сильными землетрясениями. Эпицентры роев землетрясений изображены незакрашенными звездочками или закрашенными кружками с цифрами (соответствующими табл.1,2). Кружки отмечают землетрясения сопоставляемые гидродинамическим аномалиям. Активные вулканы –закрашенные звездочки. Точка гидродинамических наблюдений изображена большим незакрашенным треугольником.

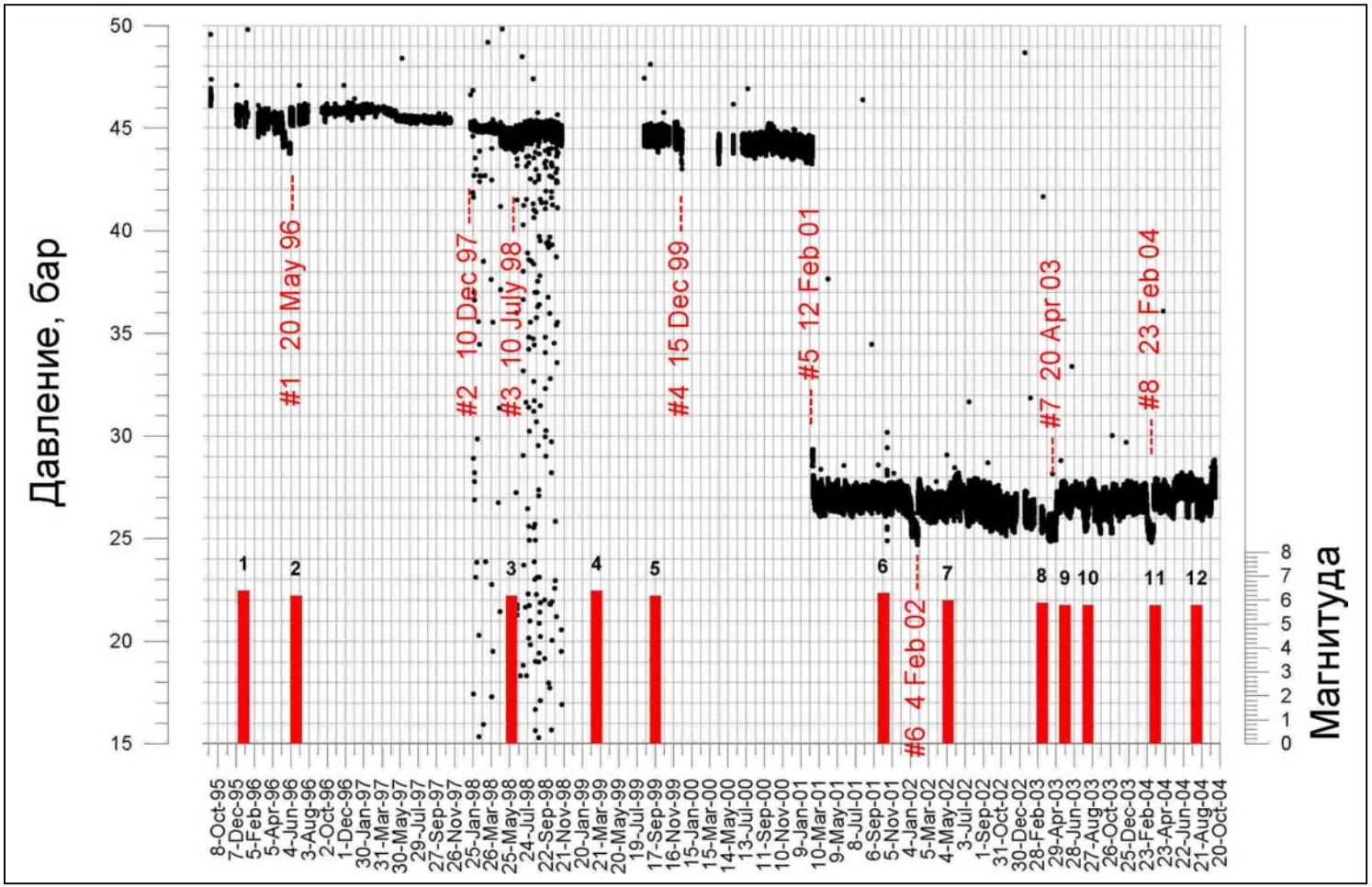

Рис.2 Верхний график - изменение давления в скв.30, нижний график – времена и магнитуды роев землетрясений (M>5.8 в области, ограниченной 157-161 в.д., 51-54 с.ш. и глубиной до 40 км, по данным КОМСП ГС РАН). На графике давления изображены моменты аномального снижения давления.

Таблица 1. Землетрясения с магнитудой не менее 5.8, происшедшие в области (157-161 в.д.,51-54 с.ш.) в период с 15 октября 1995 по 15 октября 2004 (по данным КОМСП ГС РАН). Землетрясения относящиеся к одному рою имеют одинаковый номер во второй колонке). Номера землетрясений соответствуют рис. 1,2.

#	##	Дата	Время	Град. с. ш.	Град. в.д.	Глубина, км	Магнитуда
1	1	1 янв 96	09:57:45.8	53.88	159.44	0	6.4
2	2	21 июн 96	13:57:05.6	51.27	159.63	2	6.2
	2	30 июн 96	11:32:20.4	51	160.84	0	5.8
	2	18 июл 96	22:54:58.0	51.22	159.82	8	6
	3	28 май 98	04:58:50.1	51.83	160.25	40	5.9
3	3	1 июн 98	05:34:02.9	52.81	160.37	31	6.2
	4	8 мар 99	05:39:57.3	51.93	159.77	32	5.8
	4	8 мар 99	05:57:46.2	51.99	159.74	0	5.8
4	4	8 мар 99	12:25:42.8	51.93	159.72	7	6.4
5	5	18 сен 99	21:28:34.2	50.99	157.84	40	6.2
	5	5 окт 99	05:01:36.1	51.08	157.77	40	5.8
	6	8 окт 01	18:14:25.7	52.62	160.46	31	6.2
6	6	8 окт 01	18:20:37.5	52.63	160.49	24	6.3
	7	8 май 02	04:12:47.1	52.22	160.44	32	5.8
7	7	8 май 02	19:45:20.1	53.73	160.93	35	6
8	8	15 мар 03	19:41:24.3	52.15	160.66	4	5.9
9	9	29 май 03	05:59:08.7	50.65	157.53	40	5.8
10	10	12 авг 03	11:45:07.4	50.97	159.2	19	5.8
11	11	20 мар 04	08:53:14.8	53.74	160.74	31	5.8
12	12	4 авг 04	11:03:31.0	52.24	159.84	5	5.8
	12	4 авг 04	21:15:11.2	52.15	159.86	4	5.8

Таблица 2. Исходные данные для расчета фактической функции распределения времени с момента гидродинамической аномалии до роя сильных землетрясений (табл. 1). Номера соответствующие анализируемым гидродинамическим аномалиям и сильным землетрясениям соответствуют рис.1,2.

# на рис.1	Гидродинамическая аномалия	# на рис.1	Землетрясение	Магнитуда	Интервал времени между гидродинамической аномалией и землетрясением, сут.	Фактическая интегральная вероятность
					0	0.000
8	23 фев 04	11	20 мар 04	5.9	26	0.125
1	20 май 96	2	21 июн 96	6.4	32	0.250
7	20 апр 03	9	29 май 03	5.8	39	0.375
6	04 фев 02	7	08 май 02	6.0	93	0.500
2	10 дек 97	3	01 июн 98	6.2	173	0.625
3	10 июл 98	4	8 мар 99	6.4	185	0.750
5	12 фев 01	6	08 окт 01	6.3	238	0.875
4	15 дек 99	6	08 окт 01	6.3	663	1.000

Таблица 3. Механизмы землетрясений с магнитудой не менее 5.8, происшедшие в области (157-161 в.д.,51-54 с.ш.) в период с 15 октября 1995 по 15 октября 2004 (по данным Harvard CMT Catalog). Номера землетрясений соответствуют рис. 1,2.

#	Дата	Простирание 1	Угол падения 1	Угол сдвига 1	Простирание 2	Угол падения 2	Угол сдвига 1
2	21 июн 96	211	25	83	38	66	93
3	1 июн 98	210	22	78	43	68	95
4	8 мар 99	242	28	101	49	62	84
6	8 окт 01	189	26	51	51	70	107
7	8 май 02	233	28	108	33	64	81
8	15 мар 03	229	21	96	43	70	88
9	29 май 03	217	32	96	30	58	86
12	4 авг 04	208	26	89	30	64	91

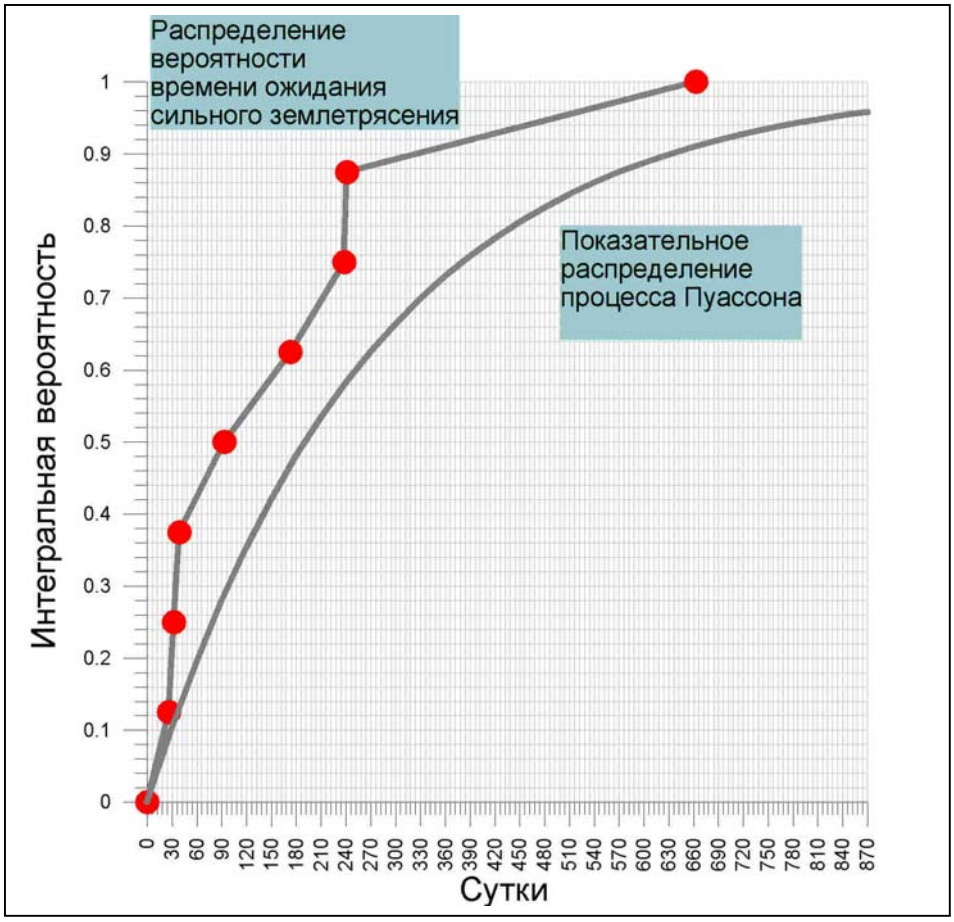

Рис.3 Интегральная вероятность времени ожидания сильного землетрясения после наблюдаемой гидродинамической аномалии - график с кружками. Показательное распределение, соответствующее процессу Пуассона с интенсивностью потока событий 3.7 10^{-3} сут$^{-1}$ (1 землетрясение в 9 месяцев) - непрерывная линия, соответствующая интегральной вероятности землетрясения с M>5.8 в зоне 157-161 в.д.,50-54 с.ш., до глубины 40 км.

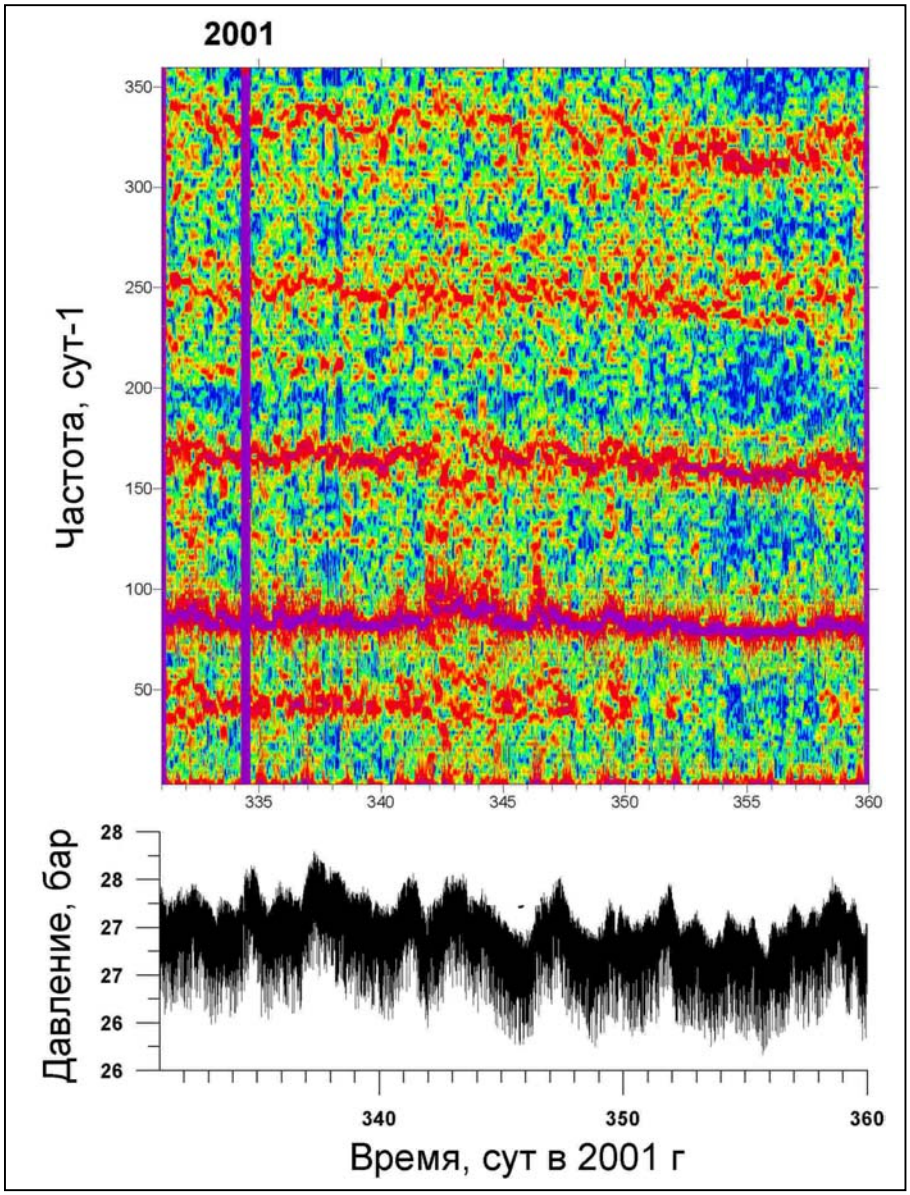

Рис. 4 Пример циклических изменений давления в скв. 30, Мутновское геотермальное месторождение. Нижние графики показывают изменение давления в скважине, верхние графики – соответствующую спектрограмму за декабрь 2001 г.

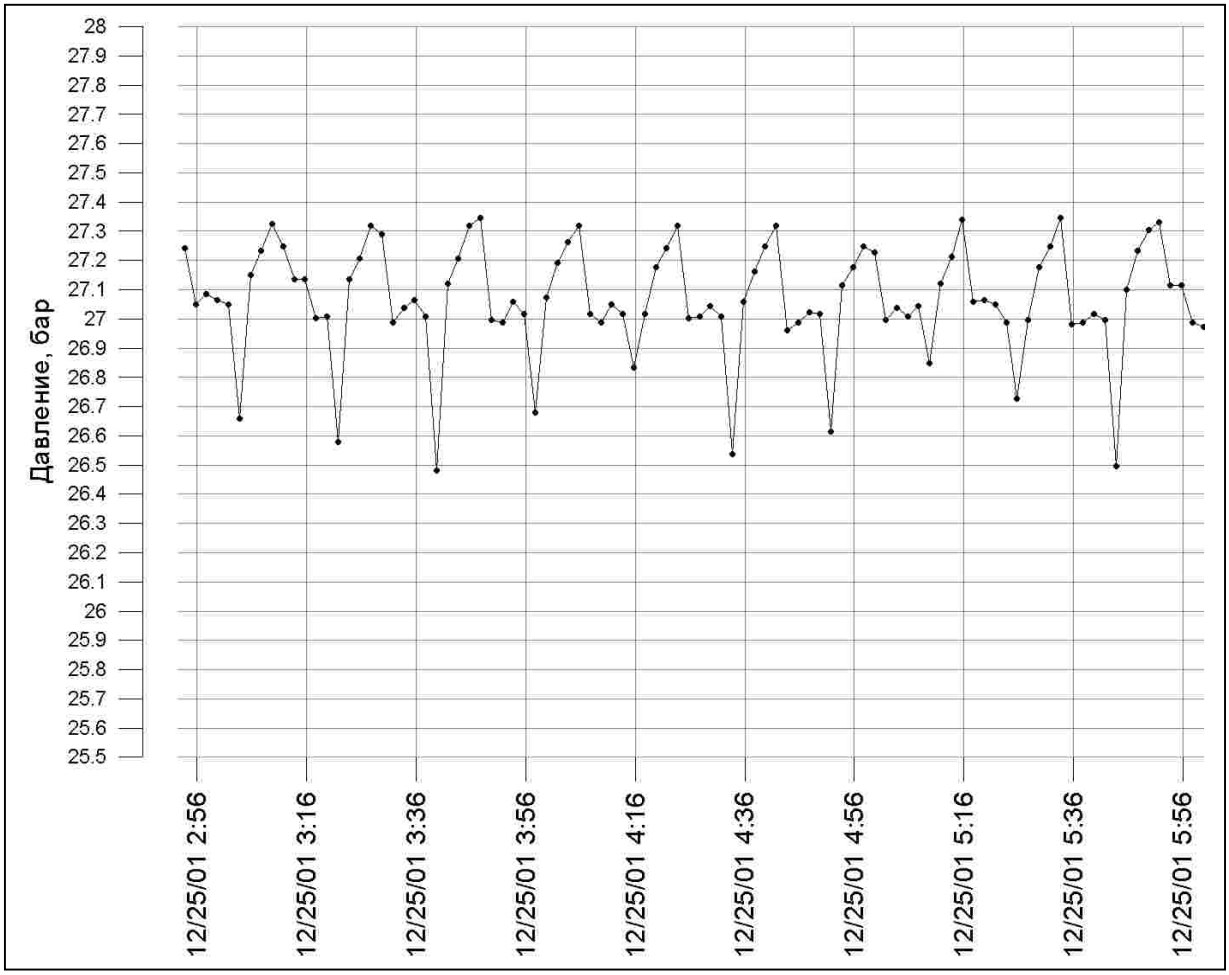

Рис. 5 Пример циклических изменений давления в скв. 30, Мутновское геотермальное месторождение. График показывает изменение давления в течение трех часов 25 декабря 2001 г.

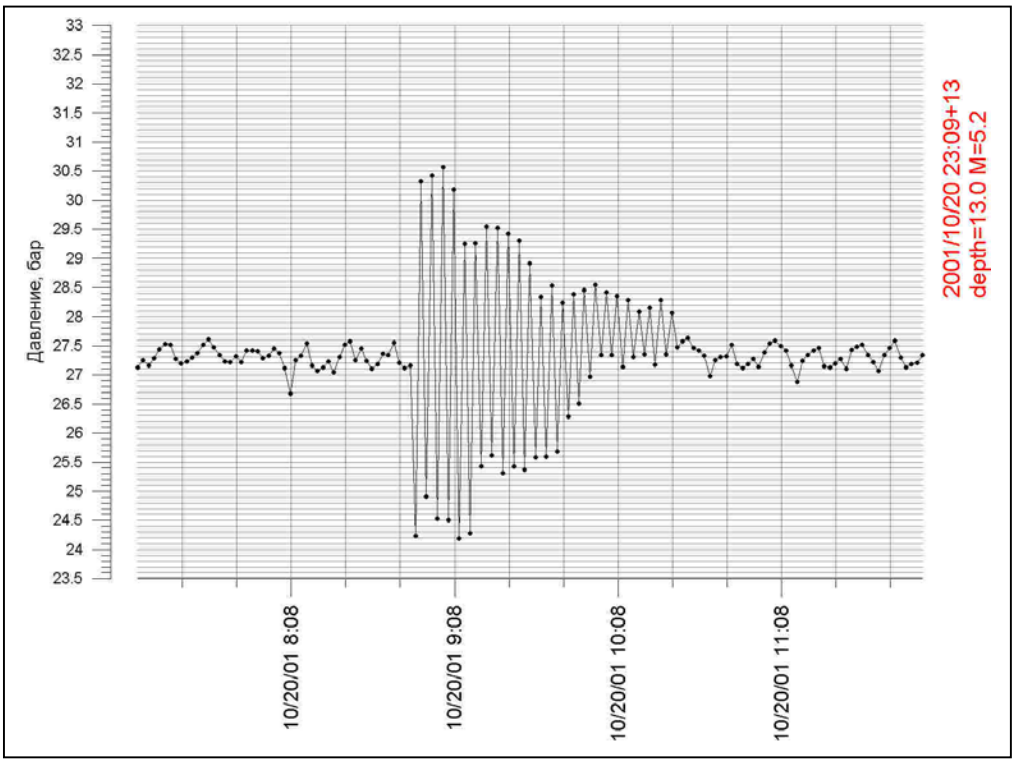

Рис. 6 Гидродинамическая аномалия в скв. 30 Верхне-Мутновского геотермального месторождения, зафиксированная за 17 часов до землетрясения (M=5.2, глубина 13 км, координаты 52.55 с.ш., 160.54 в.д.).

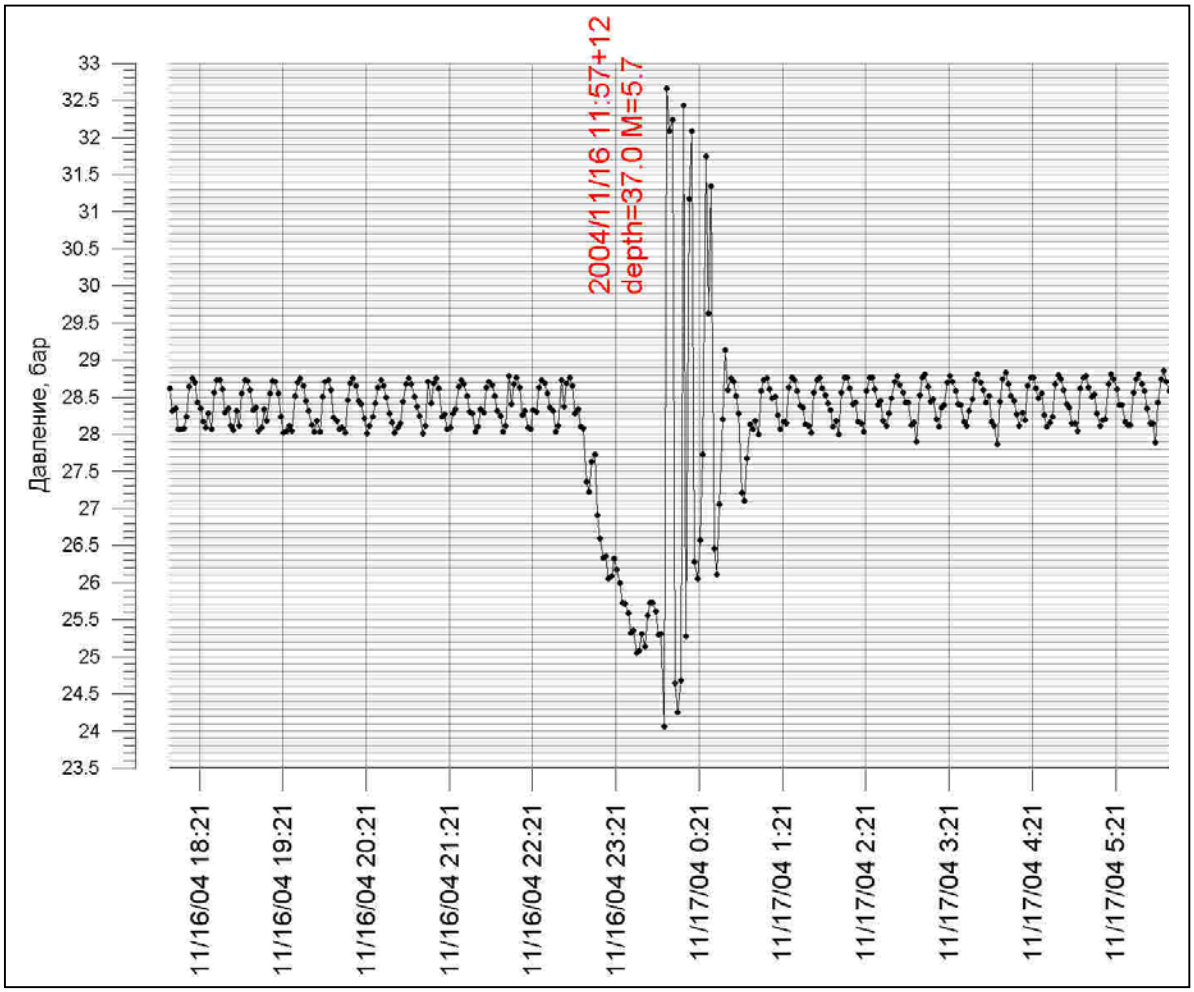

Рис. 7 Гидродинамическая аномалия в скв. 30 Верхне-Мутновского геотермального месторождения, синхронизированная с землетрясением (M=5.7, глубина 37 км, координаты 52.96 с.ш., 160.45 в.д.).

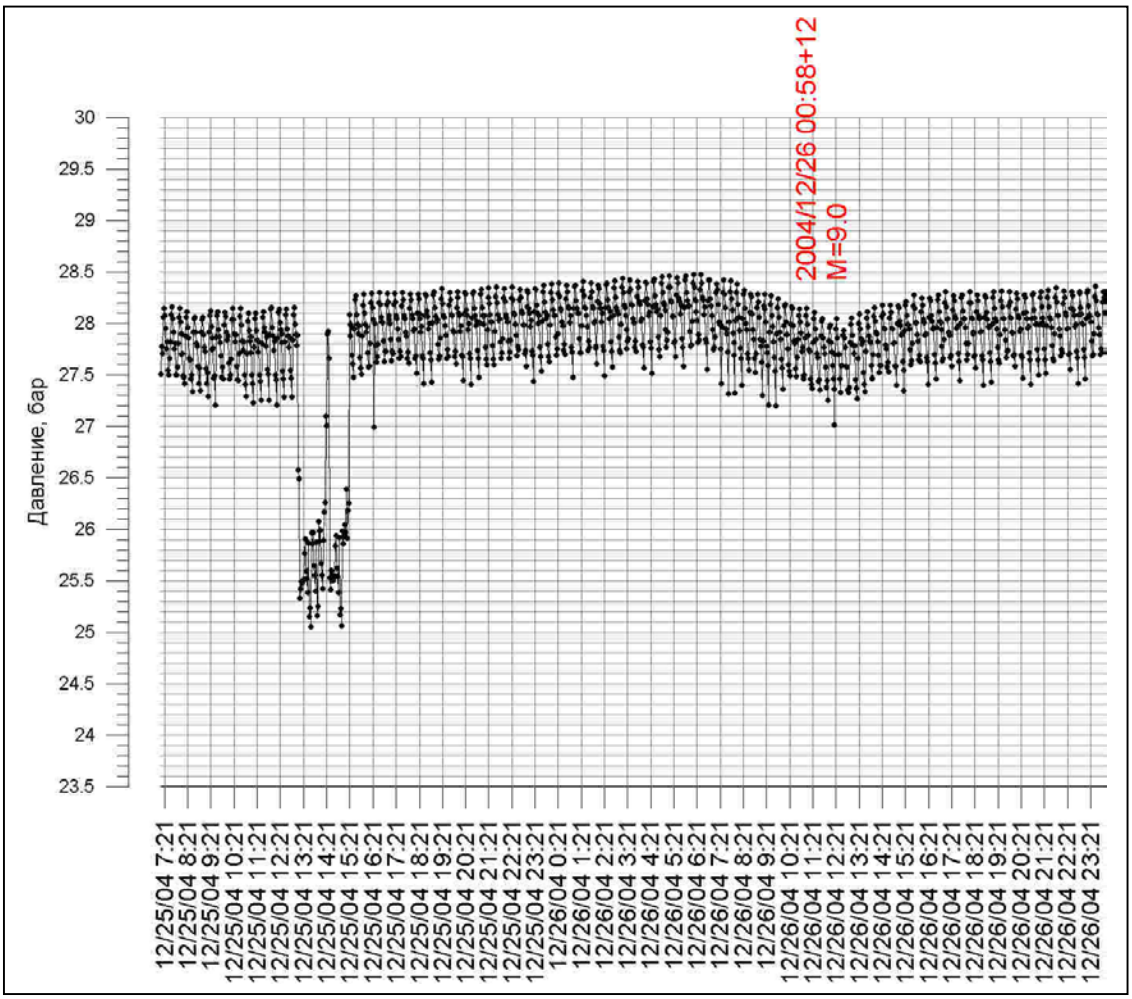

Рис. 8 Гидродинамическая аномалия в скв. 30 Верхне-Мутновского геотермального месторождения, зафиксированная за 24 часа до цунамигенного землетрясения (M=9.0), происшедшего 26 дек. 2004 г в у берегов о. Суматра (Индонезия).